

Technical Paper

## Potensi Penggunaan Bambu sebagai Tabung Resonator *Thermoacoustics Refrigeration*

### *Potential Use of Bamboo as Resonator Tube of Thermoacoustics Refrigeration*

Edy Hartulistiyoso, Staff Pengajar Departemen Teknik Mesin dan Biosistem,  
Email : edyhartulistiyoso@gmail.com

Muhamad Yulianto, Staff Pengajar Departemen Teknik Mesin dan Biosistem FATETA-IPB,  
Email : muhamad\_yulianto@yahoo.com

Irawan Sentosa, Graduate student Departemen Teknik Mesin FTUI,  
Email: irawan.sentosa15@gmail.com

#### **Abstract**

*Thermoacoustics refrigeration is considered as one of cooling method, which recently developed. This method can be applied for cooling of foods in particular vegetables. The important components in thermoacoustics refrigeration are: resonator tube, Stack, acoustics driver and working fluid. The advantages of thermoacoustic refrigeration include the use of relatively simple components, consequent energy saving, and most importantly thing is environmentally friendly. Recent researches has highlighted the necessity to develop resonator tube and stack concerning shape, design, size and basic material which is used to produce resonator tube and stack. This paper comprehensively reviews the current state of technology to develop shape, design, size, and basic material in the development of thermoacoustics refrigeration. It is concluded that the use of bamboo as basic material can be applied with continuing research of its application may lead to the use of thermoacoustic refrigeration for food and vegetables.*

**Keywords:** *thermoacoustics refrigeration, bamboo, resonator tube, stack, food and vegetables*

#### **Abstrak**

*Thermoacoustic refrigeration merupakan salah satu metode pendinginan yang saat ini banyak dikembangkan. Metode ini dapat diaplikasikan untuk mendinginkan makanan dan sayur-sayuran. Beberapa komponen-komponen penting dalam thermoacoustic refrigeration diantaranya adalah : tabung resonator, stack, pembangkit akustik dan fluida kerja. Keunggulan penggunaan metode thermoacoustic refrigeration sebagai metode pendinginan adalah : penggunaan komponen yang lebih sedikit, penghematan energi, dan yang paling penting adalah ramah lingkungan. Penelitian-penelitian terbaru banyak memfokuskan pada pengembangan tabung resonator dan stack terutama pada hal-hal yang berkaitan dengan bentuk, design, ukuran dan material dasar yang digunakan pada pembuatan tabung resonator dan stack. Artikel ini secara komprehensif meninjau kondisi perkembangan teknologi yang berkaitan dengan bentuk, design, ukuran dan material dasar pada pengembangan thermoacoustic refrigeration. Artikel ini mempunyai kesimpulan bahwa penggunaan bambu sebagai tabung resonansi dapat diaplikasikan dengan penelitian yang berkelanjutan untuk dapat diaplikasikan juga sebagai thermoacoustic refrigeration untuk makanan dan sayur-sayuran.*

**Kata kunci:** *thermoacoustic refrigeration, bambu, tabung resonansi, stack, makanan dan sayur-sayuran*

*Diterima: 17 Juni 2013; Disetujui: 26 September 2013*

#### **Latar Belakang**

*Thermoacoustic refrigeration merupakan salah satu metode pendinginan yang saat ini mulai banyak dikembangkan. Alasan dilakukan pengembangan thermoacoustic refrigeration diantaranya adalah: penggunaan komponen yang lebih sederhana, penggunaan energi relatif rendah dan yang paling penting adalah ramah lingkungan (Bao et al, 2006,*

*Ishikawa et al, 1996).* Pada dasarnya, *thermoacoustic refrigeration* merupakan fenomena perpindahan energi dari dingin ke panas yang dihasilkan dengan membangkitkan medan gelombang akustik disekitar batas benda padat yang diambil dari sebuah *stack* yang terbuat dari tumpukan benda paralel pada perangkat gelombang berdiri (Marx et al 2006) dalam pengertian yang lebih mudah di pahami adalah gelombang bunyi yang dapat menyebabkan

perbedaan suhu karena adanya udara yang melalui kanal-kanal kecil dalam perambatannya. Komponen-komponen yang digunakan pada *thermoacoustic refrigeration* dapat dilihat skematis pada gambar 1 (Tijani et al, 2002). Komponen tersebut terdiri dari penghasil gelombang akustik yang biasanya menggunakan *loudspeaker* (Pengeras suara), resonator yang biasanya berbentuk silinder (*tube*) dan *stack* yang biasanya menggunakan tumpukan plat.

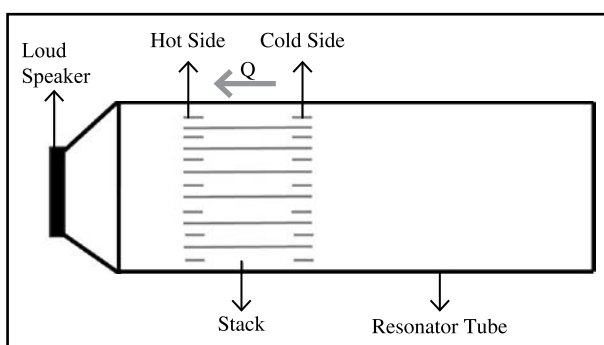
Penelitian di bidang *thermoacoustic* baik itu *thermoacoustic refrigeration* maupun *thermoacoustic heat engine* sudah banyak dilakukan terutama dalam hal bentuk, design, ukuran dan bahan yang digunakan pada pembuatan tabung resonator dan *stack*. Penelitian-penelitian tersebut diantaranya adalah : Penggunaan *stainless steel* dengan diameter luar 18,5 mm dengan variasi panjang dari 4 sampai 9 m yang menghasilkan bahwa pada panjang 8 m suhu yang dihasilkan adalah 88,6 K (Tang et al, 2006), Sementara itu dalam sebuah penelitian menyatakan bahwa syarat sebuah tabung resonator harusnya mempunyai unsur : padat, ringan, dan cukup kuat. Penggunaan logam silinder dengan perbandingan diameter pada penyempitan tabung resonator 0,54 dapat mengurangi kehilangan energi 0,2 watt (Tijani et al 2002), Penelitian lanjutan menyebutkan bahwa dengan menggunakan tabung resonator dari aluminium mampu menghasilkan suhu -65°C dalam waktu 500 menit (Tijani et al, 2002), Sementara itu dengan bahan dasar tabung resonator yang sama hanya berbeda designnya diperoleh bahwa tabung resonator yang berbentuk silinder ganda (D1 dan D2) dibandingkan dengan tabung resonator yang berbentuk lurus (D1=D2) dihasilkan osilasi gelombang yang paling baik adalah dengan menggunakan tabung resonansi yang berbentuk lurus (D1=D2) (Tang et al 2006). Penelitian lainnya menyebutkan dengan bahan tabung resonator *stainless steel* diameter dalam 0,038 m dengan variasi panjang 0,5, 0,6, 0,8, 1,1, 1,4 m dan fluida kerjanya adalah nitrogen menghasilkan bahwa untuk panjang tabung resonator 1,4 m menghasilkan beda suhu antara sisi dingin dan sisi panas yang paling kecil yaitu 447 K (Hariharan et al, 2013). Eksperimental dengan

menggunakan tabung resonator akrilik diameter 4,0 cm dan 5,3 cm dengan variasi ketebalan *stack* 0,15 mm, 0,5 mm dan 1 mm yang sudah dilakukan dengan menghasilkan beda suhu antara sisi dingin dengan panas adalah 14,8°C pada frekuensi 180 Hz (Putra et al 2013). Sedangkan tabung pyrex dengan panjang 175 mm dan diameter dalam 20 mm sudah digunakan juga pada *thermoacoustic heat engine* dengan hasil beda temperatur 170°C (Ortins et al, 2012). Selain eksperimental, simulasi juga sudah dilakukan diantaranya adalah : simulasi berdasarkan hukum termodinamika ke dua yang menghasilkan pembangkitan entropi yang rendah sangat cocok dengan posisi *stack* dekat dengan tekanan antinode (Piccolo et al, 2013). Simulasi lainnya dengan menggunakan analisis CFD menghasilkan pembangkitan osilasi terjadi pada jarak minimal  $\frac{1}{4}$  dari panjang tabung resonator (Zink et al, 2010). Selain itu simulasi untuk mendapatkan frekuensi yang tepat juga sudah dilakukan dengan menggunakan analisis CFD, dengan kesimpulan bahwa frekuensi 300 Hz sudah dapat menghasilkan gelombang akustik dengan konstruksi *stack* secara paralel dan *co-axial*. (Yu et al, 2010).

Negara Indonesia merupakan negara agraris yang kaya akan produk-produk pertanian dan perkebunan tropika. Udara tropis yang panas dan lembab menyebabkan produk pertanian dan perkebunan mudah rusak, sehingga memerlukan penanganan dengan aplikasi teknologi yang tepat, misalnya mesin pendingin. Hal ini merupakan peluang untuk mengaplikasikan *thermoacoustic refrigeration* sebagai pendingin untuk produk pertanian seperti buah dan sayuran. Selain itu salah satu produk pertanian yang banyak dijumpai di Indonesia adalah bambu. Penelitian tentang bambu untuk mengetahui karakteristik mekanis maupun termalnya sudah banyak dilakukan. Dari hasil penelitian tersebut diketahui bahwa jika dibandingkan dengan logam, nilai konduktifitas termal kaca *pyrex* lebih kecil yaitu 1,4 W/m.K maka bambu mempunyai peluang untuk digunakan sebagai tabung resonator yang mempunyai nilai konduktifitas termal sampai dengan 7,529 W/m.K (Sakaray et al, 2012, Mounika et al, 2012, Kiran et al, 2012). Paper ini merupakan studi literatur yang membahas state of the art dari pengembangan *thermoacoustic refrigeration* dan potensi penggunaan bambu sebagai tabung resonator.

### Dasar Teori Tentang *Thermoacoustics*

*Thermoacoustics* adalah sebuah ilmu fisis yang memaparkan tentang gelombang bunyi yang dapat menyebabkan perbedaan suhu yang biasa disebut *thermoacoustics refrigeration* atau perbedaan suhu yang dapat menghasilkan gelombang bunyi yang biasa disebut *thermoacoustic heat engine*. Gelombang bunyi hanya dilihat sebagai osilasi tekanan dan gerak, namun pada saat yang bersamaan gelombang bunyi juga terjadi osilasi suhu



Gambar 1. Ilustrasi *thermoacoustic refrigeration* (Tijani et al 2002)

dalam yang menyebabkan terjadinya gradien suhu. Prinsip dasar tentang *thermoacoustic* dapat dilihat pada gambar 2a dan 2b. Gambar 2a. merupakan skema *thermoacoustic refrigeration* (Rossing et al, 2007). Sedangkan pada gambar 2b. merupakan skema *thermoacoustic heat engine* (Rossing et al, 2007).

### Thermoacoustic refrigeration

*Thermoacoustic refrigeration* terjadi apabila bunyi merambat melalui kanal-kanal kecil yang mengakibatkan panas beresilasi dan mengalir ke dan dari dinding kanal. *Thermoacoustic refrigeration* terdiri dari pembangkit akustik bisa dari piston maupun *loudspeaker*, *stack* terbuat dari kanal-kanal agar tercipta perbedaan temperatur sisi panas dan dingin, dan juga fluida kerja sebagai media penghantar gelombang akustik.

### Prinsip kerja

Prinsip kerja dari *thermoacoustic refrigeration* terdiri dari 4 tahapan. Pada gambar 3 dapat dilihat tahapan kerja *thermoacoustic refrigeration* berdasarkan kondisi kenaikan dan penurunan tekanan dan suhu sebagai berikut (Agustina, et al 2013, Wetzel et al, 1997, Babei et al, 2008):

#### 1. Kompresi Adiabatik

Bila gas dikompresi, yang akan terjadi adalah kenaikan suhu dan tekanan dari  $T$  ke  $T^{++}$  dan dari  $P$  ke  $P^{++}$ .

#### 2. Perpindahan panas irreversible

Kenaikan suhu pada gas menyebabkan perpindahan panas dari gas ke *stack* karena suhu *stack* lebih rendah. Sehingga yang terjadi adalah penurunan suhu dari  $T^{++}$  menjadi  $T^+$  sedangkan tekanan tetap  $P^{++}$ .

#### 3. Ekspansi Adiabatik

Perpindahan panas yang terjadi secara terus menerus menyebabkan penurunan suhu menjadi  $T^-$  dan tekanan tetap  $P^{++}$ . Kemudian gas akan mengalami ekspansi dan kembali ke keadaan semula yaitu temperatur  $T$  dan tekanan  $P$  sehingga suhu *stack* akan lebih tinggi dari suhu gas

#### 4. Perpindahan Panas Irreversibel

Pada tahapan ini, panas berpindah dari *stack* ke gas sehingga suhu dan tekanan kembali ke keadaan awal yaitu  $T$  dan  $P$ .

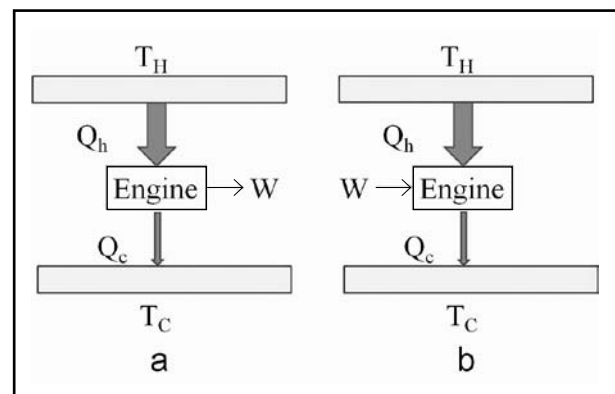
Dari tahapan tersebut terlihat bahwa prinsip kerja dari *thermoacoustic refrigeration* berbeda dengan prinsip kerja sistem refrigerasi kompresi uap yang memerlukan beberapa peralatan diantaranya kompresor, kondenser, katup ekspansi dan evaporator.

### Parameter dan persamaan-persamaan pada komponen-komponen sistem *thermoacoustic refrigeration*

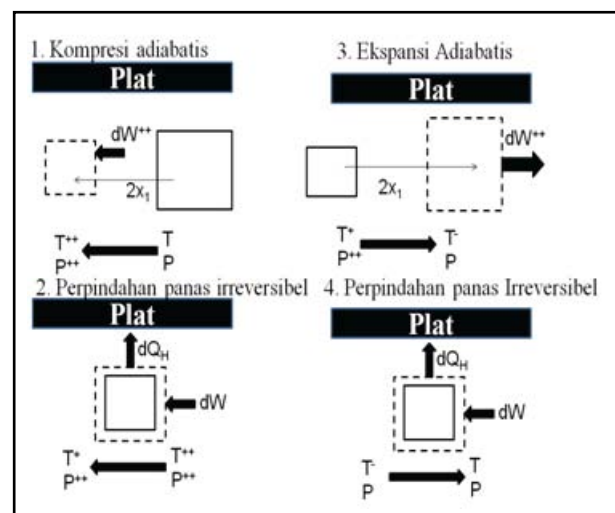
Parameter dan persamaan-persamaan pada pembuatan komponen-komponen yang digunakan dalam *thermoacoustics refrigeration* adalah sebagai berikut :

#### 1. Tabung resonator

Bentuk dan panjang dari resonansi ditentukan oleh frekuensi resonansi dan rugi-rugi minimal pada dinding dari tabung resonator. Panjang tabung resonator biasanya bervariasi terhadap panjang gelombang akustik yang dihasilkan, pada penelitian-penelitian sebelumnya ditentukan panjang resonator adalah  $\frac{\lambda}{2}$ , atau  $\frac{\lambda}{4}$  dengan bentuk-bentuk seperti gambar 4 (Hariharan et al, 2013, Tijani et al 2002, Ortins et al 2012). panjang gelombang ini berkaitan dengan panjang dari tabung resonator. Tipe tabung baik yang tertutup maupun yang terbuka pada bagian akhir juga mempengaruhi persamaan yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada persamaan 1 dan 2 berikut ini :



Gambar 2. a. Skema dasar thermoacoustics refrigeration, b. Skema dasar thermoacoustics heat engine (Rossing et al, 2007)



Gambar 3. Tahapan thermoacoustic refrigeration

Persamaan pada tabung yang kedua ujung tertutup maupun terbuka (Collard, 2012)

$$\lambda = 2.L \quad [1]$$

Persamaan pada tabung yang salah satu ujungnya tertutup atau terbuka (Collard et al, 2012):

$$\lambda = 4.L \quad [2]$$

Sedangkan untuk tabung resonator tak terhingga mempunyai persamaan sebagai berikut (Collard, 2012):

$$\lambda = L \quad [3]$$

Kemudian parameter frekuensi juga menjadi hal yang tidak terpisahkan dalam menentukan panjang tabung resonansi, dimana persamaan frekuensi dapat ditulis (Ortins, 2012, Pan et al, 2013):

$$f = \frac{a}{\lambda} \quad [4]$$

dimana  $a$  dapat dituliskan dengan persamaan (Ortins, 2012):

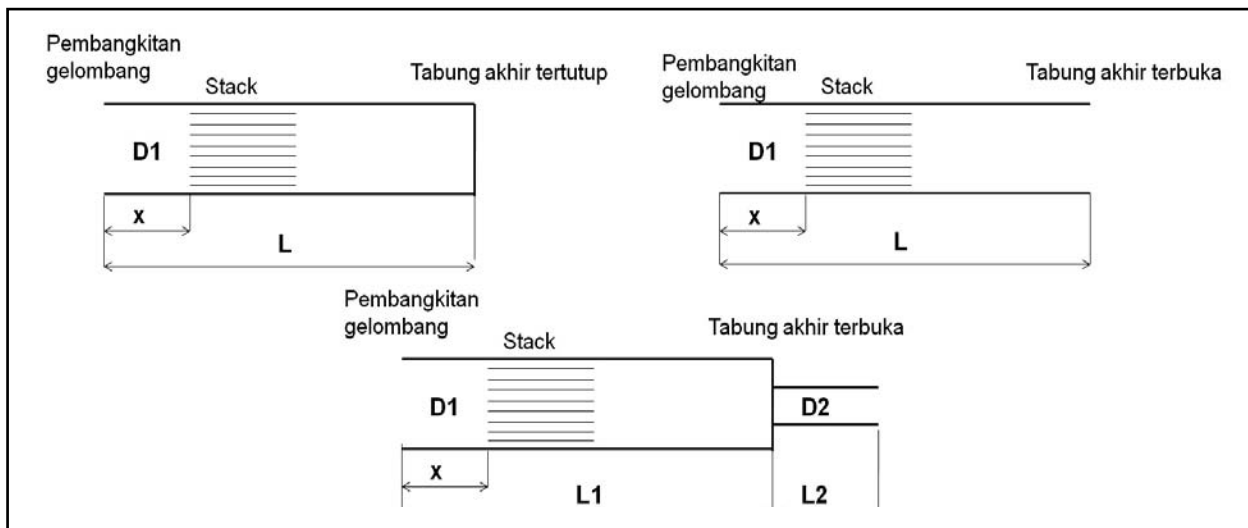
$$a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_m} \quad [5]$$

dan temperatur rata-rata dapat dituliskan (Ortins, 2012)

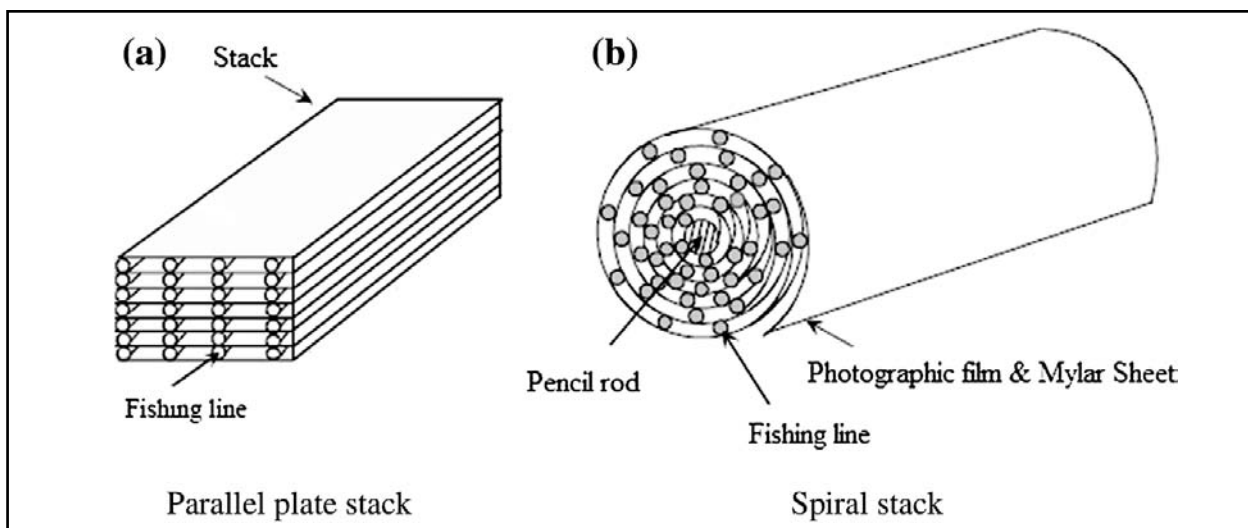
$$T_m = \frac{T_h + T_c}{2} \quad [6]$$

Selain panjang tabung resonator, diameter tabung resonator merupakan parameter yang harus menjadi acuan dalam menentukan frekuensi, sehingga dapat dituliskan (Agustina, 2013):

$$f = \frac{na}{4.L + \frac{14D}{2/3\pi}} \quad [7]$$



Gambar 4. Bentuk tabung resonator (Tijani et al, 2002)



Gambar 5. Bentuk design stack (Hariharan et al, 2013 dan tijani et al 2002)

Dengan nilai  $a = 331.4 + 0,6 T$  (m/s)  
Sedangkan material yang sudah dipakai untuk penelitian menggunakan logam, alumunium, tembaga, besi, kaca *pyrex* dan PVC.

## 2. Stack

Material yang digunakan dalam pembuatan *stack* harus mempertimbangkan panas konduksi yang terjadi pada *stack* dan juga gas yang melewati *stack* dan mempunyai efek negatif dalam unjuk kerja pendinginan (Tijani et al, 2002, Swift et al, 1988). Bentuk-bentuk *stack* yang sudah digunakan pada umumnya dikategorikan menjadi 2 bentuk, yaitu bentuk paralel dan bentuk *circular* seperti yang terlihat pada gambar 5 tetapi lebih disarankan bentuk *stack* paralel karena mudah dalam proses pembuatan (Hariharan et al, 2013). Kedalaman penetrasi thermal merupakan salah satu faktor yang harus diperhatikan, persamaan yang bisa digunakan adalah (Nsofor et al, 2007):

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{p_m \cdot C_p \cdot \omega}} \quad [8]$$

Sedangkan untuk kedalaman penetrasi viskositas dapat dituliskan dengan persamaan (Nsofor et al, 2007):

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{p_m \cdot \omega}} \quad [9]$$

*Stack* yang pada umumnya mempunyai bagian yang tertutup maupun terbuka atau disebut juga sebagai porositas seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Perbandingan antara bagian yang terbuka dan yang tertutup disebut *Blockage Ratio* (B) yang besarnya dapat dihitung dengan (Konaina et al, 2012, Putra et al 2013):

$$B = \frac{y_o}{y_o + l} \quad [10]$$

Parameter lainnya yang penting adalah gradien suhu kritis. Gradien suhu kritis ini menentukan panjang dari *stack* yang dapat menghasilkan perubahan temperatur akibat adanya gelombang akustik yang melalui *stack*. Besarnya gradien suhu kritis dapat ditulis sebagai berikut (Agustina, 2013, Collard et al, 2012, Wetzel et al 1997):

$$\nabla T_{crit} = \frac{\omega \cdot A \cdot P_A}{p_m \cdot C_p \cdot U_A} \quad [11]$$

Sedangkan rasio gradien suhu yang melewati kanal *stack* dan suhu kritis dapat dihitung dengan persamaan (Agustina, 2013, Konaina et al 2012, Tijani et al, 2002, Wetzel et al, 1997) :

$$\Gamma = \frac{\nabla T_m}{\nabla T_c} = \frac{\nabla T_{mn} \tan(xn)}{(y-1) \cdot B \cdot Lsn} \quad [12]$$

## 3. Pengeras Suara (Loud Speaker)

Pada *thermoacoustic refrigeration*, pengeras

suara atau *loud speaker* merupakan alat yang digunakan untuk menghasilkan suara yang akan dikonversikan ke dalam perubahan suhu melalui fluida yang mengalir dalam *stack*. Parameter dan persamaan-persamaan yang digunakan dalam perencanaan *loud speaker* berhubungan dengan efisiensi, hal ini dikarenakan *loud speaker* merupakan komponen yang mengkonsumsi energi listrik.

Daya total yang dibutuhkan akustik dapat dituliskan dengan persamaan (Konaina et al 2012) :

$$W_t = W_s + W_{res} + W_{chx} + W_{hhx} \quad [13]$$

Selain persamaan diatas, persamaan yang digunakan untuk menghitung daya terutama input energi listrik dapat ditulis dengan persamaan (Tijani et al, 2002):

$$P_e = \frac{1}{2} V \cdot I \cdot \cos \theta \quad [14]$$

Apabila tekanan amplitudo dan kecepatan amplitudo diketahui maka (Tijani et al, 2002):

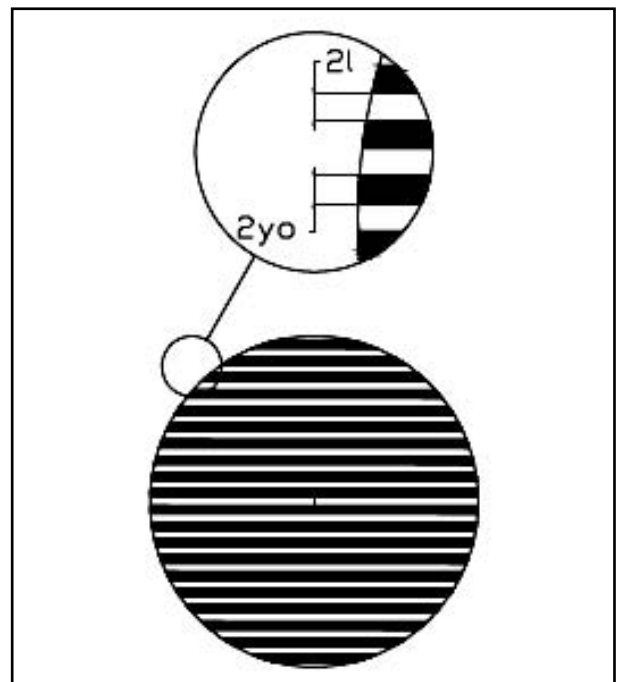
$$W = \frac{1}{2} \cdot P \cdot U \cdot \cos \theta \quad [15]$$

Sehingga efisiensi elektroakustik dapat ditulis dengan (Tijani et al, 2002):

$$\eta_{ea} = \frac{W}{P_e} \quad [16]$$

## 4. Fluida kerja

Fluida kerja dalam *thermoacoustic refrigeration*



Gambar 6. Unsur Blockage Ratio pada stack (Konaina et al, 2012)



Tabel 1. Sifat-sifat material tabung resonator

Material	K (W/m.K)	$\sigma_y$ MPa	$\sigma_t$ MPa
Tembaga	401	69	200
Aluminium	237	35	90
Stainlesteel	24	520	860
Besi	15,1	180	380
Kaca Pyrex	1,4	50	68
Bambu	7,529	109	128

merupakan media penghantar gelombang akustik yang akan dikonversikan menjadi perbedaan suhu. Aliran gas yang digunakan sebagai media perantara aliran gelombang akustik yang akan dikonversikan menjadi perubahan suhu, parameter yang harus diperhatikan adalah bilangan prandtl, yang dapat dituliskan sebagai berikut (agustina, 2013):

$$\sigma = \frac{C_p \cdot \mu}{K} \quad [17]$$

Faktor lainnya adalah rasio kedalaman penetrasi thermal dan kedalaman penetrasi viskos yang dapat dituliskan dengan persamaan (Agustina, 2013, Tijani et al, 2002,):

$$\frac{\delta v^2}{\delta k} = \sigma \quad [18]$$

*Thermoacoustics refrigeration* berhubungan dengan pendinginan, oleh karena itu faktor unjuk kerja pada *thermoacoustic refrigeration* adalah koefisien kinerja pendinginan (COP). COP dapat dituliskan dengan persamaan (Agustina, 2013, Tijani et al, 2002,):

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad [19]$$

COP juga dapat dinyatakan sebagai kinerja karnot atau  $COP_c$  sebagai berikut (Agustina, 2013, Paek et al, 2007,):

$$COP_{Carnot} = \frac{T_c}{\Delta T} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad [20]$$

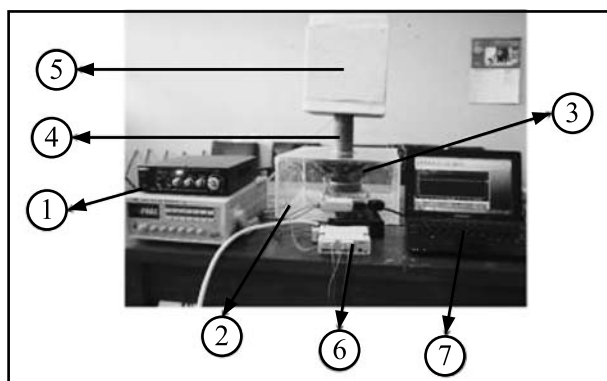
## Aplikasi Bambu Sebagai Tabung Resonator

### Sifat Bambu dibandingkan material resonator lainnya

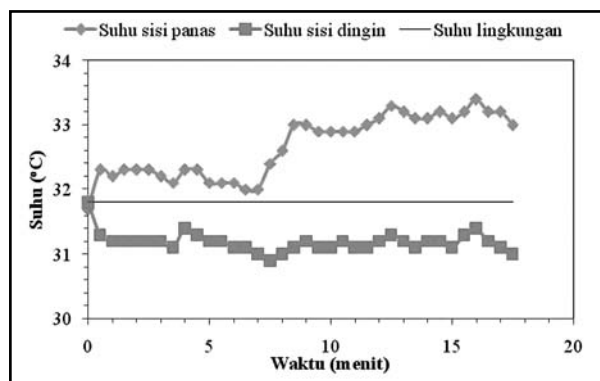
Pada penjelasan-penjelasan diatas sudah dipaparkan mengenai beberapa material yang sudah digunakan untuk tabung resonator, diantaranya tembaga, aluminium, stainlesssteel, besi dan kaca pyrex. Pada tabel 1 dapat dilihat perbedaan sifat mekanis dan thermal dari Tembaga, aluminium, besi (McClintock et al, 1996, Moran et al, 2006), stainlesssteel (Leffler et al, 1996, Moran et al, 2006), kaca pyrex (Leffler et al, 1996, White, 2007, Moran et al, 2006) dibandingkan dengan bambu (Mounika et al, 2012, Kiran et al, 2012 dan Sakaray et a, 2012, Sabbir et al 2011). Pada tabel tersebut dapat dilihat untuk jenis logam baik tembaga, alumunium, besi maupun stainlesssteel mempunyai nilai konduktifitas thermal (K) yang tinggi dibandingkan dengan kaca pyrex dan bambu. Nilai konduktifitas thermal yang tinggi akan menyebabkan kemampuan menghantarkan panas yang tinggi juga sehingga kemungkinan mengalirkan fluida kerja ke dalam *stack* juga tinggi. Logam-logam tersebut juga mempunyai nilai tegangan *Ultimate* ( $\sigma_t$ ) dan tegangan *Yield* ( $\sigma_y$ ) yang tinggi sehingga mempunyai kekuatan yang tinggi. Kaca pyrex sebagai tabung resonansi sudah banyak diaplikasikan. Jika dilihat dari nilai K,  $\sigma_t$ , dan  $\sigma_y$  maka sifat kaca pyrex tidak jauh berbeda dengan bambu. Hal inilah yang mendasari bahwa bambu mempunyai peluang besar untuk dijadikan sebagai tabung resonator pada *thermoacoustic refrigeration*.

### Pengembangan *thermoacoustic* dengan menggunakan bambu sebagai tabung resonator

Berdasarkan hasil studi literatur tetang *state of the art* dari *thermoacoustic refrigeration*, dapat diketahui



Gambar 7. Thermoacoustic refrigeration dengan bambu sebagai tabung resonator.



Gambar 8. Hasil pengujian awal tabung resonator dari bambu [Yulianto, et al 2013]

bahwa selama ini pengembangan thermoacoustic refrigeration khususnya pada komponen tabung resonator terbuat dari material logam, PVC, akrilik, Stainlesssteel dan kaca pyrex. Pada tulisan ini menjelaskan tentang belum adanya penelitian yang menggunakan bambu sebagai tabung resonator. Berdasarkan hal tersebut maka terbuka peluang untuk dilakukan penelitian tentang *thermoacoustic refrigeration* dengan tabung resonansi dari bambu yang bisa dikatakan sebagai biomaterial.

Rancangan *Thermoacoustic refrigeration* dengan bambu sebagai tabung resonator dapat dilihat pada gambar 7. Bagian-bagian dari alat tersebut adalah : 1. Acoustic driven (Pembangkit akustik), 2. Dudukan load Speaker, 3. Load Speaker, 4. Bambu, 5. Storage, 6. DAQ sistem, 7. CPU.

Pada penelitian awal didapatkan bahwa dengan tabung resonator dari bambu dan stack dari steel wool panjang 3 cm, posisi stack 2 cm serta frekuensi 150 hz seperti yang terlihat pada gambar 8 menghasilkan suhu maksimum disisi panas 33,4°C dan suhu minimum di sisi dingin adalah 30,9°C dengan suhu lingkungan 31,8°C [Yulianto, et al 2013]. Hasil ini menunjukan nilai yang berdekatan dengan pengujian thermoacoustic refrigeration dengan tabung resonansi PVC dengan stack dari lembaran akrilik dengan panjang 11 cm dan posisi stack 5,5 cm frekuensi 275 hz yang menghasilkan beda suhu 1,79°C [Putra, et al 2012] selain itu hasil penelitian awal menunjukan fenomena awal yang sama dengan tabung resonansi yang terbuat dari aluminium dengan stack type circular dari plastik film [Newman, et al 2006].

### Simpulan

Simpulan yang bisa didapatkan dari studi literatur pada artikel ini adalah :

1. Bambu mempunyai peluang digunakan sebagai tabung resonator karena mempunyai sifat mendekati kaca pyrex.
2. Parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam pengembangan thermoacoustic refrigeration diantaranya adalah : Daya yang diperlukan untuk pembangkitan akustik, panjang gelombang, frekuensi, dimensi tabung resonator, konduktifitas thermal, kedalaman penetrasi akustik, gradien suhu, suhu kritis

### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada DIKTI melalui LPPM IPB yang memberikan dana hibah BOPTN dengan no kontrak 314/IT3.41.2/L2/SPK/2013 untuk melaksanakan penelitian dalam pengembangan thermoacoustic refrigeration dengan bambu sebagai tabung resonator.

### Daftar Pustaka

- Agustina, D. 2013. Kinerja sistem pendingin termoakustik dengan variasi geometri stack dan rasio penggerak. Tesis Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia
- Babaei, H., Kamran Siddiqui. 2008. Design and Optimization of thermoacoustic devices. Elsevier International Journal of Energy Conversion and Management. Vol 49 (2008) 3585 – 3598.
- Bao, R., G. B. Chen., K. Tang., Z.Z. Jia., W. H. Cao. 2006. Effect of RC load on performance of thermoacoustic engine. international journal of Cryogenics Vol 46 (2006) : 666 – 671.
- Collard, S. 2012. Design and Assembly of a Thermoacoustic Engine Prototype. Thesis of Engineering. Helsinki Metropolia University of Applied Science
- Hariharan, N. M., P. Sivashanmugam., S. Kasthuriangan. 2013. Influence of operational and geometrical parameters on the performance of twin thermoacoustic prime mover. International Journal of Heat and Mass Transfer 64 (2013) : 1183 - 1188
- Ishikawa, H., P. A. Hobson. 1996. Optimisation of heat exchanger design in a thermoacoustic engine using second law analysis. Int. Comm. Heat Mass Transfer. Vol 23 (1996) : 325 – 334
- Jebali, Fathi., Jean Valentin Luubiez., Maurice – Xavier Francois. 2004. Response of a thermoacoustic refrigerator to the variation of driving frequency and loading. International Journal of Refrigeration Vol 27 (2004) 165-175
- Kiran, M.C., Anand Nandanwar., M. Venugopal Naidu., K. Ch. Varada Rajulu. 2012. Effect of Density on Thermal Conductivity of Bamboo Mat Board. International Journal of Agricultural and Forestry Vol 5 (2012) 257-261
- Konaina, Eng. Tareq., Nasser Yassen. 2012. Thermoacoustic solar cooling for domestic usage sizing software part (1). Internasional Journal of Energy Procedia Vol 18 (2012) 119-130.
- Leffler, Bela. 1996. Stainless steels and their properties. A hand book.
- Marx, David., Xianan Mao., Artur J. Jaworski. 2006. Acoustic coupling between the loudspeaker and the resonator in a standing-wave thermoacoustic device. Elsevier International Journal of Applied Acoustics Vol 67 (2006) : 402 – 419.
- McClintock, F.A. and A.S. Argon. 1996. Mechanical Behavior of Material. Wesley Publication
- Moran, J. Michael., Howard N. Shapiro. 2006. Fundamental of Engineering Thermodynamic Si Version 5th edition. ISBN : 0470030372
- Mounika, M., K. Ramaniah., A. V. Ratna Prasad., K. Mohana Rao., K. Hema Chandra Reddy. 2012. Thermal Conductivity Characterization of Bamboo Fiber Reinforced Polyester Composite. J. Mater. Environ. Sci 3 Vol 6 (2012) : 1109 – 1116

- Nsofor, E C., Serdar Celik., X Wang. 2007. Experimental study on the heat transfer at the heat exchanger of the thermoacoustic refrigerating system. *International Journal of Applied Thermal Engineering* Vol 27 (2007) 2435-2442.
- Ortins, Krystyna Eva Buda. 2012. Prototype design for thermoacoustic flashover detector. Thesis faculty of the graduate school University of Maryland
- Paek, Insu., James E Braun., Luc Mongeau. 2007. Evaluation of standing-wave thermoacoustic cycle for cooling application. *Elsevier International Journal of Refrigeration* Vol 30 (2007) 1059 - 1071
- Pan, Na., Chao Shen., Shuangfeng Wang. 2013. Experimental study on the flow and heat transfer characteristics of thermoacoustic core. *International Journal of Experimental Thermal and Fluid science* Vol 44 (2013) 219 – 226.
- Putra, Nandy., Dinni Agustina. 2013. Influence of stack plate thickness and voltage input on the performance of loudspeaker-driven thermoacoustic refrigerator. *ScieTech Journal of Physics : Conference Series* Vol 423 (2013) : 012050
- Putra, Nandy, Dinni Agustina, Gilang AIV, Sabdo W. 2012. Pengaruh parameter stack serta Variasi Frekuensi Terhadap Performa Termal Pendinginan Termoakustik. *Prosiding Seminar Nasional IX Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri Kampus Itenas 17–18 Januari 2012*. ISSN 1693-3168
- Newman, Jonathan., Bob Cariste., Alejandro Queiruga., Issac Davis., Ben Plotnick., Michael Gordon., Sidney san Martin. 2012. Thermoacoustic Refrigeration. *GSET Research Journal*. Hal 1 - 8
- Piccolo, A. 2013. Optimization of thermoacoustic refrigerators using second law analysis. *Elsevier International Journal of Applied Energy* Vol 103 (2013) : 358 – 367.
- Rossing, Thomas D. 2007. *Handbook of Accoustics*. Springer science+business media, LLC. Newyork. e-ISBN : 0-387-30425-0
- Sakaray, Harish., N.V. Vamsi Krishna Togati., I.V. Ramana Reddy. 2012. Investigation on properties of bamboo as reinforcing material in concrete. *International Journal of Engineering Research and Application* Vol 2 (2012) 077-083.
- Swift, G.W., 1988. Thermoacoustic engine. *International Journal of Acoust Society*. Vol 84 (1988) 1146-1180
- Tang, K., G. B. Chen., T. Jin., R. Bao., B. Kong., L. M. Qiu. 2006. Influence of resonance tube length on performance of thermoacoustically driven pulse tube refrigerator. *Elsevier International Journal of Cryogenics* Vol 45 (2006) : 185 – 191
- Tang, K., G. B. Chen., T. Jin., R. Bao., X. M. Li. 2006. Performance comparison of thermoacoustic engines with constant-diameter resonant tube and tapered resonant tube. *Elsevier International Journal of Cryogenics* Vol 46 (2006): 699 – 704.
- Tijani, M. E. H., J. C. H. Zeegers., A. T. A. M. De Waele. 2002. Design of thermoacoustic refrigerators. *Elsevier International Journal of Cryogenics* Vol 42 (2002) : 49 – 57.
- Tijani, M. E. H., J. C. H. Zeegers., A. T. A. M. De Waele. 2002. Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator. *Elsevier International Journal of Cryogenics* Vol 42 (2002) : 59 – 66.
- Wetzel, Martin., Cila Herman. 1997. Design optimization of thermoacoustics refrigerators. *Elsevier International Journal of Refrigeration*. Vol 20 (1997) 3-21.
- White, Rachel Lynn. 2007. *Glass A Structure Material*. Thesis of Department Architectural Engineering and Construction Science College of Engineering. Kansas State University
- Yu, Guoyao., W. Dai. Ercang Luo. 2010. CFD simulation of a 300 Hz thermoacoustic standing wave engine. *Elsevier International Journal of Cryogenic* Vol 50 (2010): 615 – 622
- Yulianto, Muhamad., Edy Hartulistiyoso. 2013. Karakterisasi Penggunaan Bammbru Sebagai Tabung Resonator pada Pengembangan Thermoacoustic Refrigeration. *Prosiding Seminar Nasional Unjani 28 Oktober 2013*.
- Zink, Florian., Jeffrey Vipperman., Laura Schaefer. 2010. CFD simulation of termoacoustic cooling. *Elsevier Internaional Journal of Heat and Mass Transfer* Vol 53 (2010) : 3940 – 3946.